

Л. Ю. Ворочаева¹, доц., mila180888@yandex.ru, С. И. Савин², ст. науч. сотр., s.savin@innopolis.ru,

А. С. Яцун¹, доц., ayatsun@yandex.ru,

¹ Юго-Западный государственный университет, г. Курск,

² Университет Иннополис, г. Иннополис

Исследование работы системы корректировки длины корпуса в процессе изменения конфигурации трехзвенного ползающего робота¹

Рассматриваются вопросы движения трехзвенного ползающего робота по горизонтальной шероховатой поверхности, обеспечивающего изменение его конфигурации. Контакт робота с поверхностью осуществляется в четырех опорах, спроектированных таким образом, что коэффициент трения в них является управляемой величиной, что позволяет периодически фиксировать те или иные опоры на поверхности. Робот состоит из модулей, каждый из которых представляет собой поступательную пару, а между собой модули соединены двухкоординатными шарнирами. Предложено рассматривать эти модули как звенья переменной длины. Для данного устройства найдены основные кинематические соотношения, задан вектор обобщенных координат и описаны накладываемые в процессе движения связи. Изменение конфигурации робота происходит при фиксации на поверхности двух крайних опор за счет плоского движения звеньев из заданного начального в требуемое конечное положение. Реализация такого движения требует изменения длин звеньев (в самом простом случае достаточно изменения длины одного звена, в самом сложном — трех), для осуществления которого предложена оригинальная система корректировки. В работе рассматривается наиболее простой вариант корректировки, заключающийся в варьировании длины одного звена, в качестве которого выступает корпус робота, движения двух других звеньев определяются работой соответствующих приводов. В результате численного моделирования определен диапазон допустимых значений удлинения/укорочения корпуса робота при варьировании относительного угла между корпусом и одним из боковых звеньев в заданном диапазоне. Помимо этого, выявлены четыре интервала изменения относительного угла, на каждом из которых характер варьирования длины центрального звена отличается числом достигаемых максимумов и минимумов. Также построены зависимости изменения угла поворота бокового звена, при котором длина корпуса достигает своих максимального и минимального значений, от ранее указанного относительного угла и времени движения. Приведены и проанализированы временные законы изменения углов поворота звеньев.

Ключевые слова: трехзвенный ползающий робот, управляемые движения, изменение конфигурации, блок управления походкой, блок формирования задающих воздействий, блок управления звеньями, система корректировки длин звеньев

Введение

Разработка роботов для перемещения в сложных для человека условиях (включая туннели, естественные пещеры, трубопроводы, завалы, инженерные конструкции и т.д.) представляет как теоретический, так и прикладной интерес. Такие исследования требуют использования комбинации методов механики многозвенных систем с контактным взаимодействием (односторонними механическими связями) [1], теории управления многозвенными роботами с учетом действия сил трения,

методов планирования движения для систем с большим числом степеней свободы в условиях, когда пространство возможных движений существенно ограничено, и т.д. Сложность задачи повышается в связи с желанием использовать механизмы с анизотропным трением в опорах [2] или с использованием опор с переменным и управляемым трением [3], что обусловлено демонстрируемыми ими практическими преимуществами.

Современные исследования в области ползающих роботов во многом концентрируются на поиске оптимальных конструкций и допустимых локомоций для этих конструкций. Многие разрабатываемые конструкции биоморфны или биоинспирированы [4, 5]. При

¹Работа выполнена в рамках Гранта Президента МК-200.2019.1.

этом многие новые конструкции ползающих роботов можно отнести к шагающим роботам [5]. Их отличительная черта, позволяющая относить их к ползающим конструкциям, может быть определена как богатство режимов их контактного взаимодействия с опорной поверхностью, включая режим качения в случае четырехногого робота Scorpio [5].

Еще одним интересным направлением в робототехнике ползающих роботов является оснащение их модулями дополнительной мобильности, например модулем для прыжков, как это сделано в работе [6]. Сходный прогресс наблюдается в области прыгающих и шагающих роботов, оснащаемых колесными модулями [7].

При всем многообразии работ в области поиска новых форм для ползающих роботов классическая последовательная структура, рассмотренная в работах Ф. Л. Черноусько и других исследователей [8, 9], представляет особый интерес в связи с возможностью получения полноценного формального описания движения таких роботов. В этой работе рассматривается робот, состоящий из звеньев переменной длины (пары твердых тел, соединенных линейным актуатором) с двухкоординатными активными шарнирами и опорами с переменным трением [10, 11]. Решается задача поиска походок, включая управляемое изменение длины звеньев робота для избегания перехода робота в особые положения, при которых дальнейшее перемещение устройства невозможно.

Описание трехзвенного ползающего робота

Конструкция и принцип движения

Исследуемый робот представляет собой цепочку из трех последовательно соединенных между собой звеньев $K_i M_i$, $i = 1, 2, 3$, с изменяемыми длинами l_i (рис. 1, а). Каждое звено можно рассматривать как поступательную пару, образованную двумя элементами (звеньями) постоянной длины, где длины этих элементов $K_i P_i$ и $D_i M_i$ равны l_{i1} и l_{i2} , их перемещение друг относительно друга обеспечивается приводами 4–6 (рис. 1, б). Звенья соединены между собой двухкоординатными шарнирами с установленными в них приводами, за счет которых осуществляются повороты звеньев друг относительно друга на углы φ_{21} и φ_{32} в горизонтальной плоскости (приводы 7 и 8) и углы θ_{21} и θ_{32} — в вертикальной плоскости (приводы 9 и 10).

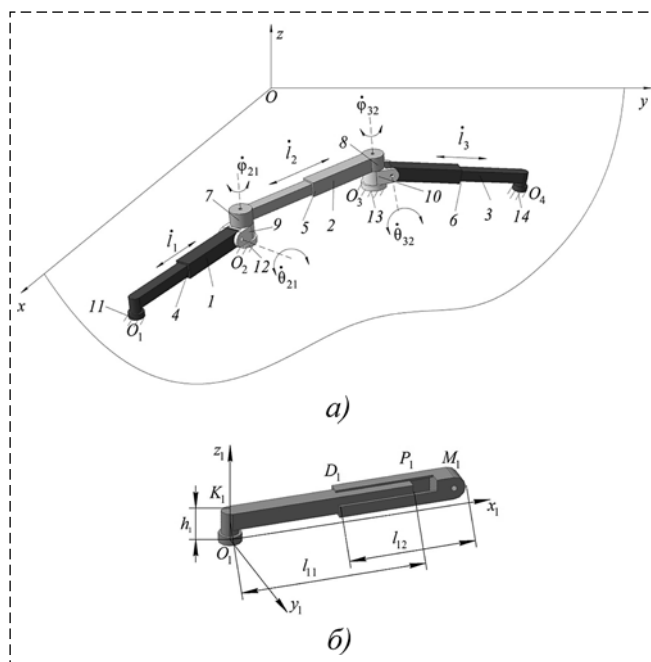


Рис. 1. Расчетная схема ползающего робота (а); схема звена 1 (б)
Fig. 1. Diagram of the crawling robot (a); a scheme of the link 1 (b)

На концах звеньев расположены опорные элементы 11–14 (точки O_j , $j = 1, \dots, 4$) с управляемым коэффициентом трения f_j , одна из возможных конструкций которых и принцип работы описаны в работе [12]. Коэффициент трения в каждой опоре может принимать два значения: минимальное $f_{\min}$ и максимальное $f_{\max}$. В рабочем режиме функционирования робота в случае минимального коэффициента опоры движется по поверхности, а в случае максимального — располагается неподвижно:

$$x_{Oj} = \begin{cases} x_{Oj}, & f_j = f_{\min}, \\ \text{const}, & f_j = f_{\max}, \end{cases}$$

$$y_{Oj} = \begin{cases} y_{Oj}, & f_j = f_{\min}, \\ \text{const}, & f_j = f_{\max}. \end{cases}$$

Движение робота в пространстве $Oxyz$ осуществляется путем реализации различных походок, при каждой из которых какие-либо две опоры устройства зафиксированы на поверхности:

- при $f_1 = f_2 = f_{\max}$ и $f_3 = f_4 = f_{\min}$ на поверхности неподвижно располагается звено 1;
- при $f_2 = f_3 = f_{\max}$ и $f_1 = f_4 = f_{\min}$ — неподвижно звено 2;
- при $f_3 = f_4 = f_{\max}$ и $f_1 = f_2 = f_{\min}$ — неподвижно звено 3;
- при $f_1 = f_4 = f_{\max}$ и $f_2 = f_3 = f_{\min}$ все звенья устройства движутся с учетом возможности осуществления перемещения.

При этом походки могут быть как плоскими (ни одна из опор не отрывается от плоскости Oxy), так и пространственными. Первые из них более простые как с точки зрения их реализации, так и с точки зрения управления устройством. Но в случаях движения объекта в пространствах ограниченного объема (вентиляционные шахты, коридоры, узкие проходы) или при наличии на поверхности препятствий, которые устройство при плоских походках преодолеть не может, используются пространственные движения. Предложенная конструкция ползающего робота повышает его маневренность и проходимость по различным участкам поверхностей. Дополнительным преимуществом объекта является возможность управления длинами звеньев, что позволяет устройству адаптироваться к пространствам различного объема и разным по размерам препятствиям.

Кинематическая математическая модель робота

Положение каждого звена в системе координат $Oxyz$ определяется координатами точки O_j , $j = i$, длиной l_i , а также абсолютными углами φ_i и θ_i , задающими ориентацию звена в горизонтальной и вертикальной плоскостях относительно осей Oz и Oy_i (данная ось направлена перпендикулярно звену и расположена параллельно плоскости Oxy). Будем считать, что все углы поворота отсчитываются против часовой стрелки. Тогда для их задания будем использовать соответствующие матрицы $T_{\varphi i}$ и $T_{\theta i}$:

$$T_{\varphi i} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_i & -\sin \varphi_i & 0 \\ \sin \varphi_i & \cos \varphi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$$T_{\theta i} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_i & -\sin \theta_i \\ 0 & \sin \theta_i & \cos \theta_i \end{pmatrix}.$$

При движении робота по плоской горизонтальной опорной поверхности любая его опора может быть зафиксирована на поверхности, это означает, что одно из его звеньев всегда располагается в плоскости Oxy . Для удобства описания кинематических соотношений будем считать, что это звено 1. Пусть опора O_1 имеет координаты

$$\mathbf{r}_{O1} = (x_{O1}, y_{O1}, z_{O1})^T; z_{O1} = 0, \quad (1)$$

а ориентация звена 1 задана поворотом на угол φ_1 вокруг оси Oz и на угол $\theta_1 = 0$ вокруг оси

O_1y_1 . Координаты точки O_2 (второй опоры звена 1) определяются с использованием матрицы поворота $T_{\varphi i}$ следующим образом:

$$\mathbf{r}_{O2} = \mathbf{r}_{O1} + T_{\varphi 1} \mathbf{r}_{O1O2}^{(1)},$$

где $\mathbf{r}_{O1O2}^{(1)} = (l_1, 0, 0)^T$ — относительный радиус-вектор в системе координат звена 1.

Пусть ориентация звена 2 задана углами φ_2 и $\theta_1 \geq 0$. Тогда координаты точки O_3 можно определить с использованием матриц поворота $T_{\varphi i}$ и $T_{\theta i}$:

$$\mathbf{r}_{O3} = \mathbf{r}_{O1} + T_{\varphi 1} \mathbf{r}_{O1O2}^{(1)} + T_{\varphi 2} T_{\theta 2} \mathbf{r}_{O2O3}^{(2)},$$

где $\mathbf{r}_{O2O3}^{(2)} = (l_2, 0, 0)^T$ — относительный радиус-вектор в системе координат звена 2.

Аналогичным образом определяются координаты точки O_4 , для этого используются соответствующие матрицы поворота:

$$\mathbf{r}_{O4} = \mathbf{r}_{O1} + T_{\varphi 1} \mathbf{r}_{O1O2}^{(1)} + T_{\varphi 2} T_{\theta 2} \mathbf{r}_{O2O3}^{(2)} + T_{\varphi 3} T_{\theta 3} \mathbf{r}_{O3O4}^{(3)},$$

где $\mathbf{r}_{O3O4}^{(3)} = (l_3, 0, 0)^T$ — относительный радиус-вектор в системе координат звена 3.

Вектор обобщенных координат $\mathbf{q}$ можно записать в виде

$$\mathbf{q} = (\mathbf{r}_{O1}^T, \mathbf{l}, \boldsymbol{\varphi}, \boldsymbol{\theta})^T,$$

где $\mathbf{l} = (l_1, l_2, l_3)$ — вектор длин звеньев $i = 1, 2, 3$; $\boldsymbol{\varphi} = (\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)$ — вектор углов поворота звеньев $i = 1, 2, 3$ вокруг оси Oz ; $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ — вектор углов поворота звеньев $i = 1, 2, 3$ вокруг осей Oy_i .

Высота опор звеньев робота ненулевая, причем боковые звенья расположены на высоте $h_1 = h_3 = h$, а центральное звено — на высоте $h_2 = H$ в случае плоского движения механизма. При этом $h < H$, за счет чего боковые звенья могут совершать полный оборот относительно своих вертикальных осей, проходя под корпусом робота при условии, что его длина больше длины бокового звена.

Робот представляет собой шестимассовую конструкцию: элементы поступательных пар всех трех звеньев будем моделировать в виде стержней, центры масс которых — точки C_{i1} для элементов $K_i P_i$ и точки C_{i2} для элементов $D_i M_i$ — совпадают с центрами симметрии, массы элементов равны m_{i1} и m_{i2} . Радиус-векторы центров масс элементов можно записать следующим образом:

$$\mathbf{r}_{Ci1} = \mathbf{r}_{Oi} + T_{\varphi i} T_{\theta i} \mathbf{r}_{OiCi1}^{(i)};$$

$$\mathbf{r}_{Ci2} = \mathbf{r}_{Oi} + T_{\varphi i} T_{\theta i} \mathbf{r}_{OiCi2}^{(i)};$$

где относительные радиус-векторы равны

$$\mathbf{r}_{O_1C_{i1}}^{(i)} = (l_{i1}/2, 0, h_i)^T;$$

$$\mathbf{r}_{O_1C_{i2}}^{(i)} = ((l_i - l_{i2}/2), 0, h_i)^T.$$

Тогда координаты центров масс звеньев $i = 1, 2, 3$ — точек C_i — будут определяться по следующим формулам:

$$x_{Ci} = \frac{m_{i1}x_{Ci1} + m_{i2}x_{Ci2}}{m_i};$$

$$y_{Ci} = \frac{m_{i1}y_{Ci1} + m_{i2}y_{Ci2}}{m_i};$$

$$z_{Ci} = \frac{m_{i1}z_{Ci1} + m_{i2}z_{Ci2}}{m_i},$$

где $m_i = m_{i1} = m_{i2}$ — масса i -го звена.

Описание движения робота

Будем рассматривать плоское движение робота при фиксации на поверхности двух крайних опор — точек O_1 и O_4 :

$$\begin{aligned} x_{O1} &= \text{const}, y_{O1} = \text{const}, \\ x_{O4} &= \text{const}, y_{O4} = \text{const}. \end{aligned}$$

Такой режим движения может использоваться для изменения конфигурации устройства при реализации той или иной походки. Вектор обобщенных координат можно записать следующим образом:

$$\mathbf{q} = (\mathbf{l}, \boldsymbol{\varphi})^T.$$

Пусть в момент начала движения звенья располагаются под углами $\varphi_1^{0n} = -\varphi^*$, $\varphi_2^{0n} = 0$, $\varphi_3^{0n} = 0$ (рис. 2, а). Во время движения происходит поворот звеньев 1 и 3 против и по часовой стрелке с угловыми скоростями $\dot{\varphi}_1$ и $\dot{\varphi}_3$ соответственно до тех пор, пока не будут справедливы условия: $\varphi_1^{0k} = 0$, $\varphi_2^{0k} = 0$, $\varphi_3^{0k} = -\varphi^*$ (рис. 2, б). (Верхний индекс n обозначает начальный момент времени, верхний индекс k — конечный момент времени.) На рисунках поступательные пары не показаны, подразумевается, что звенья имеют переменную длину. Зафиксированные на поверхности опоры закрашены черным цветом.

Для реализации данного движения при фиксации на поверхности крайних опор требуется варьировать длины звеньев робота. Это обусловлено необходимостью исключения особых положений устрой-

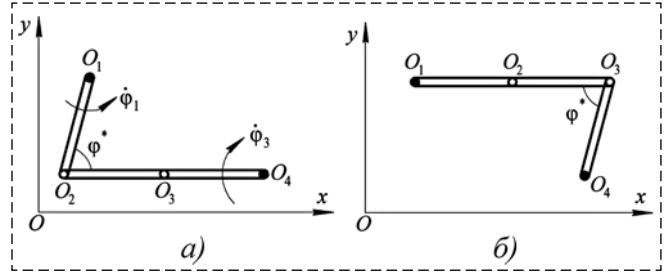


Рис. 2. Начальное (а) и конечное (б) положения робота
Fig. 2. Initial position (a) and final position (b) of the robot

ства, после достижения которых перемещение его звеньев невозможно. В особых положениях длины звеньев робота достигают своих наибольших/наименьших значений и их дальнейшее удлинение/укорочение невозможно. В работе предлагается система корректировки длин звеньев, описанная ниже.

Система управления роботом

Следует отметить, что система корректировки длин звеньев является частью системы управления движением ползающего робота, состоящей из трех блоков: блока управления походкой, блока формирования задающих воздействий (система корректировки) и блока управления звеньями (рис. 3).

Блок управления походкой, зная текущее расположение робота на плоскости $(x_{O1}^{0n}, y_{O1}^{0n}, \varphi^{0n})$, а также учитывая информацию о форме поверхности и расположенных на ней препятствиях, определяет конечное положение $(x_{O1}^{0k}, y_{O1}^{0k}, \varphi^{0k})$, в которое на этапе движения должен перейти объект. Блок формирования задающих воздействий генерирует требуемые законы изменения длин l_i^* , $i = 1, 2, 3$, звеньев робота и углов φ_i^* их поворота, используя алгоритм работы системы корректировки. Данные законы являются задающими воздействиями для управления движением звеньев робота и должны быть реализованы блоком управления звеньями, на выходе которого формируются сигналы, соответствующие фак-

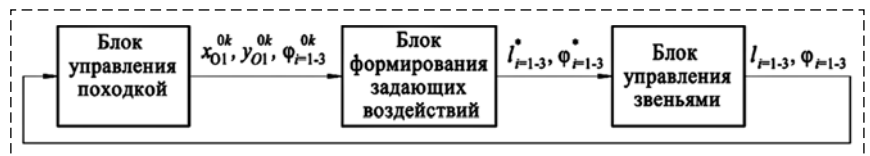


Рис. 3. Структурная схема системы управления ползающим роботом
Fig. 3. Control system diagram for the crawling robot

тическим длинам l_i и углам φ_i поворота звеньев. Данные сигналы подаются в блок управления походкой, где фактическое расположение робота сравнивается с заданным конечным. При достижении роботом последнего этап движения завершается. Следует отметить, что работа блоков управления походкой и формирования задающих воздействий осуществляется до начала непосредственного движения устройства, а блок управления звеньями функционирует во время перемещения объекта в режиме реального времени.

Система корректировки длин звеньев

В данной работе остановимся на рассмотрении работы системы корректировки длин звеньев. Пусть формируемые длины звеньев лежат в диапазонах

$$l_i^* \in [l_{i \min}, l_{i \max}],$$

где $l_{i \min}$, $l_{i \max}$ — минимально и максимально возможные длины звеньев:

$$l_{i \max} = l_i^0 + \Delta l_{i \max}, l_{i \min} = l_i^0 - \Delta l_{i \min},$$

l_i^0 — длины звеньев в момент начала движения, $\Delta l_{i \max}$, $\Delta l_{i \min}$ — предельные значения удлинения/укорочения звеньев.

Корректировка длин звеньев является последовательной. В самом простом случае требуется варьирование длины только одного звена — корпуса (звена 2). Если этого недостаточно для исключения особых положений, то требуется корректировка длины вначале одного бокового звена (например, звена 1), а затем при необходимости и второго (звена 3). Тогда алгоритм корректировки длин звеньев можно представить следующим образом.

Во время исследуемого движения крайние опоры зафиксированы на поверхности, координаты соответствующих точек равны $O_1(x_{O1}^{0n}, y_{O1}^{0n})$, $O_4(x_{O4}^{0n}, y_{O4}^{0n})$, причем эти координаты связаны между собой соотношениями

$$\begin{aligned} x_{O4}^{0n} &= x_{O1}^{0n} + l_1^0 \cos \varphi_1^{0n} + l_2^0 \cos \varphi_2^{0n} + l_3^0 \cos \varphi_3^{0n}; \\ y_{O4}^{0n} &= y_{O1}^{0n} + l_1^0 \sin \varphi_1^{0n} + l_2^0 \sin \varphi_2^{0n} + l_3^0 \sin \varphi_3^{0n}. \end{aligned}$$

Первый этап корректировки — изменение длины звена $i = 2$. Длины боковых звеньев рав-

ны $l_1^* = l_1^0$, $l_3^* = l_3^0$, а требуемая длина звена $i = 2$ задается формулой

$$l_i^* = \sqrt{(x_{O_{i+1}}^* - x_{O_i}^*)^2 + (y_{O_{i+1}}^* - y_{O_i}^*)^2}, \quad (2)$$

где $x_{O_i}^*$, $y_{O_i}^*$ и $x_{O_{i+1}}^*$, $y_{O_{i+1}}^*$ — требуемые координаты точек O_i и O_{i+1} (в данном случае — точек O_2 и O_3), движущихся по дугам окружностей относительно неподвижных опор O_1 и O_4 соответственно, радиусы этих окружностей равны l_1^0 и l_3^0 . Координаты точек O_2 и O_3 при этом должны быть равны

$$\begin{aligned} x_{O2}^* &= x_{O1}^{0n} + l_1^0 \cos \varphi_1^*; y_{O2}^* = y_{O1}^{0n} + l_1^0 \sin \varphi_1^*; \\ x_{O3}^* &= x_{O4}^{0n} - l_3^0 \cos \varphi_3^*; y_{O3}^* = y_{O4}^{0n} - l_3^0 \sin \varphi_3^*, \end{aligned} \quad (3)$$

где φ_1^* , φ_3^* — требуемые углы поворота звеньев 1 и 3 во время движения с угловыми скоростями $\dot{\varphi}_1^*$, $\dot{\varphi}_3^*$, генерируемыми приводами.

Требуемый угол поворота звена 2 определяется по формуле

$$\varphi_2^* = \arctg \left(\frac{y_{O3}^* - y_{O2}^*}{x_{O3}^* - x_{O2}^*} \right). \quad (4)$$

В случае если корректировки длины корпуса недостаточно, т.е. требуемая длина звена $i = 2$ выходит за допустимые пределы, что задается условием

$$(l_i^* > l_{i \max}) \vee (l_i^* < l_{i \min}), \quad (5)$$

то начинается второй этап корректировки — изменение длины одного из боковых звеньев. Рассмотрим случай, когда вначале происходит изменение длины звена 1.

На этом этапе корректировки длина звена 2 равна $(l_2^* = l_{2 \min}) \vee (l_2^* = l_{2 \max})$, для удобства дальнейшего описания запишем $l_2^* = l_{2m}$, где l_{2m} — любое из двух возможных допустимых значений длины. Требуемые координаты точки O_3 вычисляются по формулам (3), необходимый угол поворота звена 2 — по формуле (4). Координаты точки O_2 при этом равны

$$\begin{aligned} x_{O2}^* &= x_{O4}^{0n} - l_3^0 \cos \varphi_3^* - l_{2m} \cos \varphi_2^*, \\ y_{O2}^* &= y_{O4}^{0n} - l_3^0 \sin \varphi_3^* - l_{2m} \sin \varphi_2^*. \end{aligned}$$

Тогда требуемая длина звена 1 определяется по формуле (2), где $i = 1$. Если и этой корректировки недостаточно, что описывается условием (5), где $i = 1$, то требуется третий этап корректировки — варьирование длины звена 3.

На этом этапе требуемые длины звеньев 1 и 2 равны $l_1^* = l_{1m}$, $l_2^* = l_{2m}$, требуемый угол поворота звена 2 определяется по формуле (4), координаты точек O_2 и O_3 вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned}x_{O2}^* &= x_{O1}^{0n} + l_{1m} \cos \varphi_1^*, & y_{O2}^* &= y_{O1}^{0n} + l_{1m} \sin \varphi_1^*, \\x_{O3}^* &= x_{O1}^{0n} + l_{1m} \cos \varphi_1^* + l_{2m} \cos \varphi_2^*, \\y_{O3}^* &= y_{O1}^{0n} + l_{1m} \sin \varphi_1^* + l_{2m} \sin \varphi_2^*,\end{aligned}$$

а для определения необходимой длины звена 3 используется формула (2), в которой $i = 3$. При недостаточности выполнения и третьего этапа корректировки, что соответствует выполнению условий (5), где $i = 3$, робот переходит в особое положение, при котором наблюдаются стопорение объекта и потеря всех степеней подвижности, его дальнейшее движение невозможно. В случае если условие (5) на каждом из этапов корректировки не выполняется, то осуществляется переход к предыдущему этапу (за исключением первого).

Исследование корректировки длины корпуса

Будем рассматривать вариант корректировки длин звеньев, при котором варьирования длины звена 2 достаточно для реализации движения, вектор обобщенных координат при этом

$$\mathbf{q} = (l_2, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)^T.$$

Также будем считать, что боковые звенья 1 и 3 поворачиваются с угловыми скоростями, изменяющимися по законам, одинаковым по модулю, но противоположным по знаку:

$$\dot{\varphi}_1(t) = -\dot{\varphi}_3(t).$$

При моделировании примем длины звеньев в безразмерных величинах равными $l_i = 1$, а диапазон изменения угла $\varphi^* \in [10^\circ, 170^\circ]$.

В соответствии с принятым допущением максимально возможное значение удлинения/укорочения звена Δl_{2m} зависит от угла φ^* так, как показано на диаграмме рис. 4, а (см. вторую сторону обложки). Кривая соответствует зависимости $\Delta l_{2m}(\varphi^*)$, выше и ниже которой располагаются две области. Область 1 (выше кривой) представляет собой допустимый диапазон значений угла φ^* при том или ином значении удлинения/укорочения Δl_{2m} , когда дополнительной корректировки длин боковых звеньев

не требуется. Область 2 характеризует диапазоны значений Δl_{2m} и φ^* , при которых необходимо перейти ко второму этапу корректировки.

Все последующие исследования выполнены для значений Δl_{2m} и φ^* , расположенных в области 1.

Характер изменения длины корпуса

При изменении $\varphi^* \in [10^\circ, 170^\circ]$ можно выделить четыре участка $n = 4$ (рис. 4, б, см. вторую сторону обложки), на каждом из которых функция $l_2(\varphi_1)$ имеет свой характер, показанный на рис. 5 (см. вторую сторону обложки). Участки n выделяются в зависимости от сочетаний числа максимумов $n_{\max}$ и минимумов $n_{\min}$ функции $l_2(\varphi_1)$:

$$n = \begin{cases} 1, (n_{\max} = 1) \wedge (n_{\min} = 2); \\ 2, (n_{\max} = 3) \wedge (n_{\min} = 2); \\ 3, (n_{\max} = 2) \wedge (n_{\min} = 2); \\ 4, (n_{\max} = 2) \wedge (n_{\min} = 1). \end{cases}$$

Принцип выделения числа участков n от угла φ^* в соответствии с рис. 4 (см. вторую сторону обложки) можно записать следующим образом:

$$n = \begin{cases} 1, \varphi^* \in [10^\circ, 60^\circ); \\ 2, \varphi^* = 60^\circ; \\ 3, \varphi^* \in (60^\circ, 90^\circ); \\ 4, \varphi^* \in [90^\circ, 170^\circ]. \end{cases}$$

На рис. 5 (см. вторую сторону обложки) показан характер изменения функции $l_2(\varphi_1)$ при четырех значениях φ^* , соответствующих четырем участкам n .

Красными точками на графиках показаны максимальные значения $\max_{1..3}$ длины звена 2, а синими — минимальные $\min_{1,2}$, указанные индексы соответствуют порядковым номерам максимумов и минимумов.

По приведенным на рис. 5 графикам видно, что независимо от значения n длина корпуса вначале убывает, достигает минимума $\min_1$, а затем возрастает, причем ее убывание происходит из максимального значения $\max_1$ при $n = 2..4$. Возрастание рассматриваемой функции происходит до максимального значения $\max_1$ при $n = 1$ или $\max_2$ при $n = 2, 4$, а при $n = 3$ функция при возрастании достигает локального максимума. Следует отметить, что достижение указанных максимумов при $n = 4$ про-

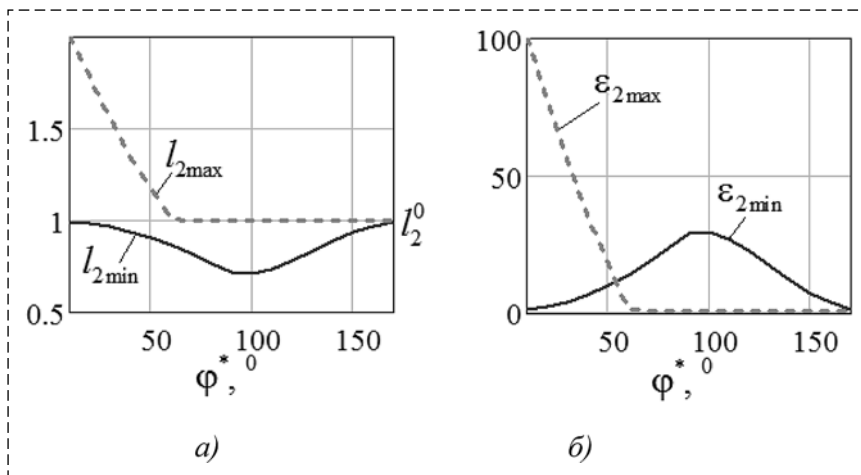


Рис. 6. Графики зависимостей:

$a - l_{2\max}(\varphi^*), l_{2\min}(\varphi^*)$; $b - \varepsilon_{2\max}(\varphi^*), \varepsilon_{2\min}(\varphi^*)$

Fig. 6. Graphs of functions:

$a - l_{2\max}(\varphi^*), l_{2\min}(\varphi^*)$; $b - \varepsilon_{2\max}(\varphi^*), \varepsilon_{2\min}(\varphi^*)$

исходит в момент завершения движения, а при $n = 1, 2, 3$ — в момент достижения звеном 1 угла φ_1^s , являющегося серединой диапазона изменения этого угла в процессе движения:

$$\varphi_1^s = (\varphi^* - 180^\circ)/2.$$

Все графики $l_2(\varphi_1)$ симметричны относительно значения φ_1^s . Помимо этого, по графикам видно, что при $n = 1$ звено 2 и удлиняется, и укорачивается, а при всех остальных значениях $n = 2, 3, 4$ длина звена 2 изменяется только в сторону уменьшения относительно начального значения l_2^0 . По мере увеличения φ^* при $n = 1$ максимальное значение длины корпуса убывает и достигает величины l_2^0 при $n = 2$, что проиллюстрировано на рис. 6, а. Затем при $n = 3$ наблюдается дальнейшее убывание величины l_2 при $\varphi_1 = \varphi_1^s$, а при $n = 4$ локальный максимум перестает существовать, вместо двух минимальных значений длины корпуса наблюдается только одно, и соответствует оно углу $\varphi_1 = \varphi_1^s$. Для большей наглядности на рис. 6, б приведены графики относительных приращений длины звена 2 при его удлинении $\varepsilon_{2\max}$ и укорочении $\varepsilon_{2\min}$:

$$\varepsilon_{2\max} = \frac{\Delta l_{2\max}}{l_2^0} 100 \%,$$

$$\varepsilon_{2\min} = \frac{\Delta l_{2\min}}{l_2^0} 100 \%.$$

По данным графикам видно, что максимальное удлинение звена 2 наблюдается при минимально возможном угле $\varphi^* = 10^\circ$ и составляет $\varepsilon_{2\max}(\varphi^* = 10^\circ) = 100 \%$. А максимальное укорочение длины звена 2 соответствует $\varphi^* = 90^\circ$ и равно $\varepsilon_{2\min}(\varphi^* = 90^\circ) = 30 \%$.

Соответствие значений максимумов значениям угла φ_1 может быть записано следующим образом (рис. 7, а, см. третью сторону обложки):

$$\left. \begin{aligned} \max_1 &= (\varphi^* - 180^\circ)/2, \quad n = 1; \\ \max_1 &= 0, \\ \max_2 &= (\varphi^* - 180^\circ)/2, \\ \max_3 &= (\varphi^* - 180^\circ), \end{aligned} \right\} n = 2;$$

$$\left. \begin{aligned} \max_1 &= 0, \\ \max_2 &= (\varphi^* - 180^\circ), \end{aligned} \right\} n = 3, 4.$$

а соответствие минимумов (рис. 7, б):

$$\left. \begin{aligned} \min_1 &= \varphi^* - 180^\circ + \Delta, \\ \min_2 &= -\Delta, \end{aligned} \right\} n = 1, 2, 3;$$

$$\min_1 = (\varphi^* - 180^\circ)/2, \quad n = 4,$$

где Δ — некоторое значение угла φ_1 , возрастающее по мере увеличения угла φ^* , как показано на графике рис. 8, а.

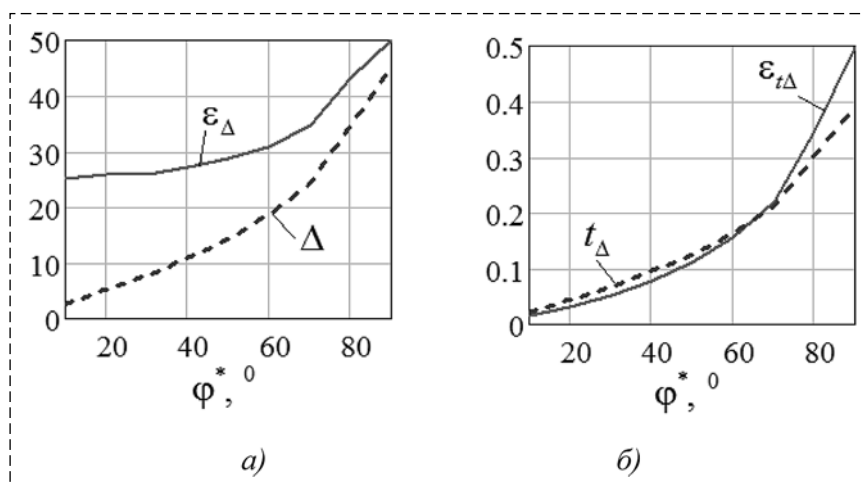


Рис. 8. Графики зависимостей:

$a - \Delta(\varphi^*), \varepsilon_{\Delta}(\varphi^*)$; $b - t_{\Delta}(\varphi^*), \varepsilon_{t\Delta}(\varphi^*)$

Fig. 8. Graphs of functions:

$a - \Delta(\varphi^*), \varepsilon_{\Delta}(\varphi^*)$; $b - t_{\Delta}(\varphi^*), \varepsilon_{t\Delta}(\varphi^*)$

На этом же рисунке показано относительное приращение величины Δ в зависимости от угла φ^* :

$$\varepsilon_{\Delta} = \frac{\Delta}{\varphi^*} 100\%.$$

Обе кривые плавно возрастают и достигают своих максимумов при $\varphi^* = 90^\circ$. При этом $\varepsilon_{\Delta} = 50\%$, так как при данном значении φ^* наблюдается "слияние" двух минимумов функции $l_2(\varphi^*)$ в один.

Зависимости моментов времени достижения максимальных $t_{\max}$ и минимальных $t_{\min}$ значений длины звена 2 от угла φ^* приведены на рис. 9 (см. третью сторону обложки).

Данные моменты времени описываются формулами:

$$\left. \begin{aligned} t_{\max 1} &= T/2, \quad n = 1; \\ t_{\max 1} &= 0, \\ t_{\max 2} &= T/2, \\ t_{\max 3} &= T, \end{aligned} \right\} n = 2;$$

$$\left. \begin{aligned} t_{\max 1} &= 0, \\ t_{\max 2} &= T, \end{aligned} \right\} n = 3, 4;$$

$$\left. \begin{aligned} t_{\min 1} &= t_{\Delta}, \\ t_{\min 2} &= T - t_{\Delta}, \end{aligned} \right\} n = 1, 2, 3;$$

$$t_{\min 1} = T/2, \quad n = 4,$$

где T — время движения; t_{Δ} — время достижения значения $t_{\min 1}$, показанное на рис. 8, б.

Характер зависимостей, представленных на рис. 8, б для относительного приращения

$$\varepsilon_{t\Delta} = \frac{t_{\Delta}}{T},$$

аналогичен ранее построенным на рис. 8, а.

Характер изменения углов поворота звеньев

Временные зависимости углов поворота всех звеньев для трех значений φ^* приведены на рис. 10 (см. третью сторону обложки). По ним видно, что углы поворота боковых звеньев изменяются пропорционально времени движения, причем угол звена 1 возрастает, а звена 3 — убывает. Кривая, по которой изменяется угол поворота корпуса, связывает между собой начальный угол звена 3 и конечный угол звена 1. Углы звеньев в момент начала $t = 0$ и завершения $t = T$ движения связаны соотношениями

$$\begin{aligned} \varphi_1(0) &= \varphi_3(T), \quad \varphi_1(T) = \varphi_3(0), \\ \varphi_2(0) &= \varphi_3(0), \quad \varphi_1(T) = \varphi_2(T). \end{aligned}$$

Наибольший интерес представляет угол поворота звена 2, так как углы поворота боковых звеньев изменяются по законам, генерируемым соответствующими приводами. Этот угол вычисляется по формуле (4) и изменяется по некоторой кривой, близкой к параболе, ветви которой направлены вниз (рис. 11, а, б).

Максимального значения угол φ_2 достигает при $\varphi_1 = \varphi_1^s$ и $t = T/2$, т.е. на середине диапазо-

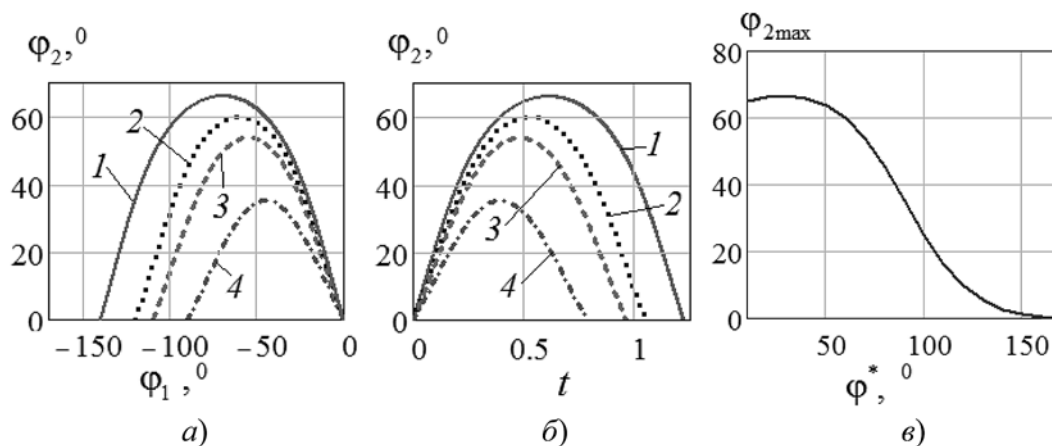


Рис. 11. Графики зависимостей:

а — $\varphi_2(\varphi_1)$; б — $\varphi_2(t)$; в — $\varphi_{2\max}(\varphi^*)$; 1 — $\varphi^* = 40^\circ$, 2 — $\varphi^* = 60^\circ$, 3 — $\varphi^* = 80^\circ$, 4 — $\varphi^* = 90^\circ$

Fig. 11. Graphs of functions:

а — $\varphi_2(\varphi_1)$; б — $\varphi_2(t)$; в — $\varphi_{2\max}(\varphi^*)$; 1 — $\varphi^* = 40^\circ$, 2 — $\varphi^* = 60^\circ$, 3 — $\varphi^* = 80^\circ$, 4 — $\varphi^* = 90^\circ$

на изменения угла φ_1 и на середине интервала времени движения, причем наибольшее значение $\varphi_{2\max}$ вначале плавно возрастает, а затем убывает по мере увеличения угла φ^* (рис. 11, в). Минимальное значение угла $\varphi_{2\min} = 0$ наблюдается в начальной и конечной точках диапазона φ_1 и t :

$$\varphi_2 = \begin{cases} \varphi_{2\max}, & \varphi_1 = \varphi_1^s; \\ \varphi_{2\min}, & (\varphi_1 = \varphi^* - 180^\circ) \vee (\varphi_1 = 0); \end{cases}$$

$$\varphi_2 = \begin{cases} \varphi_{2\max}, & t = T/2; \\ \varphi_{2\min}, & (t = 0) \vee (t = T). \end{cases}$$

Заключение

В работе рассмотрено движение трехзвенного ползающего робота по горизонтальной шероховатой поверхности во время изменения его конфигурации при фиксации на поверхности двух крайних опор боковых звеньев. Для моделирования такого движения разработана кинематическая математическая модель устройства, предложена система управления устройством, описана система корректировки длин звеньев объекта, необходимая для исключения особых положений устройства и его стопорения.

Моделирование движения робота проведено численным способом, при этом рассмотрен случай, когда корректировки длины корпуса достаточно для перемещения устройства из начальной точки в конечную с приобретением соответствующей ориентации звеньев. Для этого построена диаграмма, по которой можно определить допустимые значения удлинения/укорочения корпуса Δl_{2m} и соответствующие им значения угла φ^* . В области допустимых значений $\Delta l_{2m}(\varphi^*)$ выявлены законы изменения длины l_2 корпуса и угла φ_2 его поворота в зависимости от времени движения T и угла поворота звена 1 при различных значениях угла φ^* , обеспечивающие перемещение робота в конечное положение без стопорения.

Полученные в данной работе результаты могут быть в дальнейшем использованы при управлении движением опытного образца исследуемого робота и настройке работы системы корректировки длин его звеньев. Также следует отметить, что если конструктивно возможные значения удлинения/укорочения корпуса робота не будут попадать в установленный в ходе моделирования допустимый диапазон значений, то необходимо будет переходить

к следующему этапу корректировки — варьированию длины одного из боковых звеньев, что будет рассмотрено в последующих работах.

Список литературы

1. Drumwright E., Trinkle J. C. Contact simulation // Humanoid Robotics: A Reference. 2016. P. 1–55.
2. Koh J. S., Cho K. J. Omega-shaped inchworm-inspired crawling robot with large-index-and-pitch (LIP) SMA spring actuators // IEEE/ASME Transactions On Mechatronics. 2012. Vol. 18, N. 2. P. 419–429.
3. Ворочаева Л. Ю., Савин С. И. Классификационные признаки роботов, перемещающихся по трубам // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2018. № 3. С. 89–100.
4. Sahai R., Avadhanula S., Groff R., Steltz E., Wood R., Fearing R. S. Towards a 3g crawling robot through the integration of microrobot technologies // Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), Orlando, FL, USA. 2006. P. 296–302.
5. Tan N., Mohan R. E., Elangovan K. Scorpio: A biomimetic reconfigurable rolling–crawling robot // Intern. J. of Advanced Robotic Systems. 2016. Vol. 13, N. 5. P. 1–16.
6. Jung G. P., Casarez C. S., Jung S. P., Fearing R. S., Cho K. J. An integrated jumping–crawling robot using height-adjustable jumping module // Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), Stockholm, Sweden. 2016. P. 4680–4685.
7. Ворочаева Л. Ю., Мальчиков А. В., Савин С. И. Определение диапазонов допустимых значений геометрических параметров колесного прыгающего робота // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. № 22(2). С. 76–84.
8. Черноусько Ф. Л. Управление движением многозвенников на шероховатой плоскости // Труды Института математики и механики УрО РАН. 2000. № 6(1). С. 277–287.
9. Черноусько Ф. Л. О движении трехзвенника по горизонтальной плоскости // ПММ. 2001. Т. 65, Вып. 1. С. 15–20.
10. Ворочаева Л. Ю., Яцун А. С., Яцун С. Ф. Моделирование движения пятизвенного ползающего робота с управляемым трением по поверхности с препятствиями // Изв. РАН. ТиСУ. 2017. № 3. С. 191–216.
11. Ворочаева Л. Ю., Пановко Г. Я., Савин С. И., Яцун А. С. Моделирование движения пятизвенного ползающего робота с управляемым трением // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. № 6. С. 12–19.
12. Ворочаева Л. Ю., Наумов Г. С., Яцун С. Ф. Моделирование движения трехзвенного робота с управляемыми силами трения по горизонтальной шероховатой поверхности // Известия РАН. ТиСУ. 2015. № 1. С. 156–170.
13. Vorochaeva L. Yu., Panovko G. Ya., Savin S. I., Yatsun A. S. Movement Simulation of a Five-Link Crawling Robot with Controlled Friction Forces // J. of Machinery Manufacture and Reliability. 2017. Vol. 46, N. 6. P. 527–535.
14. Vorochaeva L. Yu., Yatsun A. S., Yatsun S. F. Simulation of the motion of a five-link crawling robot with controlled friction on a surface having obstacles // Intern. J. of Computer and Systems Sciences. 2017. Vol. 56, N. 3. P. 527–552.
15. Vorochaeva L. Yu., Naumov G. S., Yatsun S. F. Simulation of Motion of a Three-Link Robot with Controlled Friction Forces on a Horizontal Rough Surface // Intern. J. of Computer and Systems Sciences. 2015. Vol. 54, N. 1. P. 151–164.

Study of the Work of the Length Correction System for a Crawling Robot Changing its Configuration

L. Yu. Vorochaeva¹, mila180888@yandex.ru, S. I. Savin², s.savin@innopolis.ru, A. S. Yatsun¹, ayatsun@yandex.ru

¹Southwest State University, Kursk,

²Innopolis University, Innopolis

Corresponding author: Vorochaeva Lyudmila Yu., Associate Professor, Southwest State University, Kursk, 305040, Russian Federation, e-mail: mila180888@yandex.ru

Accepted on September 26, 2019

Abstract

The article discusses the movement of a three-link crawling robot on a horizontal rough surface, while changing its configuration. The robot contacts the surface in four points where active bearings are in place. The active bearings are designed in such a way that their dry friction coefficient is a controlled quantity, which allows periodically fixing these bearings to the surface. The robot consists of modules, each of which is a translational pair, and the modules are interconnected by two-axis hinges. It is proposed to consider these modules as links of variable length. In the paper, the basic kinematic relationships for this robot were found, a vector of generalized coordinates was specified, and the constraints imposed during the movement were described. The studied here motion corresponds to a scenario where two outer bearings are fixed on the surface, while links execute planar movements from a given initial to the desired final position. The implementation of such a movement requires a change in the lengths of the links (in the simplest case, a change in the length of one link is enough, in the most difficult case, all three are required to change length), for the implementation of which a correction system is proposed. The method considered in the work consists in varying the length of one link, which is the robot body, the movements of the other two links are determined by the operation of the corresponding drives. As a result of numerical simulation, the range of allowable values for the elongation / shortening of the robot body is determined by varying the relative angle between the body and one of the side links in a given range. In addition, four intervals of changes in the relative angles were revealed, at each of which the nature of the variation in the length of the central link differs in the number of maxima and minima achieved. Also, the dependences of the change in the angle of rotation of the side link, at which the length of the body reaches its maximum and minimum lengths, from the previously specified relative angle and time of movement, are constructed. The temporal laws of changes in the rotation angles of the links are given and analyzed.

Keywords: three-link crawling robot, controlled movements, configuration change, gait control unit, generation of control inputs, link control unit, link length adjustment system

Acknowledgment: This work was carried out as part of the Presidential Grant MK-200.2019.1.

For citation:

Vorochaeva L. Yu., Savin S. I., Yatsun A. S. Study of the Work of the Length Correction System for a Crawling Robot Changing its Configuration, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 4, pp. 232–241.

DOI: 10.17587/mau.21.232-241

References

1. Drumwright E., Trinkle J. C. Contact simulation, *Humanoid Robotics: A Reference*, 2016, pp. 1–55.
2. Koh J. S., Cho K. J. Omega-shaped inchworm-inspired crawling robot with large-index-and-pitch (LIP) SMA spring actuators, *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, 2012, vol. 18, no. 2, pp. 419–429.
3. Vorochaeva L. Yu., Savin S. I. Klassifikatsionnye priznaki robotov, peremeshchayushchih po trubam, *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova*, 2018, no. 3, pp. 89–100 (in Russian).
4. Sahai R., Avadhanula S., Groff R., Steltz E., Wood R., Fearing R. S. Towards a 3g crawling robot through the integration of microrobot technologies, *Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, Orlando, FL, USA, 2006, pp. 296–302.
5. Tan N., Mohan R. E., Elangovan K. Scorpio: A biomimetic reconfigurable rolling–crawling robot, *Intern. J. of Advanced Robotic Systems*, 2016, vol. 13, no. 5, pp. 1–16.
6. Jung G. P., Casarez C. S., Jung S. P., Fearing R. S., Cho K. J. An integrated jumping–crawling robot using height-adjustable jumping module, *Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, Stockholm, Sweden, 2016, pp. 4680–4685.
7. Vorochaeva L. Yu., Malchikov A. V., Savin S. I. Opredelenie diapazonov dopustimyh znachenij geometricheskikh parametrov kolesnogo prygayushchego robota, *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018, no. 22(2), pp. 76–84 (in Russian).
8. Chernous'ko F. L. Upravlenie dvizheniem mnogozvennikov na sherohovatoj ploskosti, *Trudy Instituta matematiki i mekhaniki UrO RAN*, 2000, no. 6(1), pp. 277–287 (in Russian).
9. Chernous'ko F. L. O dvizhenii tryohzvennika po gorizontальной ploskosti, *PMM*, 2001, vol. 65, no. 1, pp. 15–20 (in Russian).
10. Vorochaeva L. Yu., Yatsun A. S., Yatsun S. F. Simulation of the motion of a five-link crawling robot with controlled friction on a surface having obstacles, *Intern. J. of Computer and Systems Sciences*, 2017, vol. 56, no. 3, pp. 527–552 (in Russian).
11. Vorochaeva L. Yu., Panovko G. Ya., Savin S. I., Yatsun A. S. Movement Simulation of a Five-Link Crawling Robot with Controlled Friction Forces, *J. of Machinery Manufacture and Reliability*, 2017, vol. 46, no. 6, pp. 527–535 (in Russian).
12. Vorochaeva L. Yu., Naumov G. S., Yatsun S. F. Simulation of Motion of a Three-Link Robot with Controlled Friction Forces on a Horizontal Rough Surface, *Intern. J. of Computer and Systems Sciences*, 2015, vol. 54, no. 1, pp. 151–164 (in Russian).
13. Vorochaeva L. Yu., Panovko G. Ya., Savin S. I., Yatsun A. S. Movement Simulation of a Five-Link Crawling Robot with Controlled Friction Forces, *J. of Machinery Manufacture and Reliability*, 2017, vol. 46, no. 6, pp. 527–535.
14. Vorochaeva L. Yu., Yatsun A. S., Yatsun S. F. Simulation of the motion of a five-link crawling robot with controlled friction on a surface having obstacles, *Intern. J. of Computer and Systems Sciences*, 2017, vol. 56, no. 3, pp. 527–552.
15. Vorochaeva L. Yu., Naumov G. S., Yatsun S. F. Simulation of Motion of a Three-Link Robot with Controlled Friction Forces on a Horizontal Rough Surface, *Intern. J. of Computer and Systems Sciences*, 2015, vol. 54, no. 1, pp. 151–164.